

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsä- ja puurajoihin vuoristoalueilla

Esimerkkialueina Afrikan ylänköalueet, Alpit ja Skandit

Ninni Laukkanen

790351A
LuK-tutkielma
Maantieteen
tutkimusyksikkö
Oulun yliopisto
14.05.2020

Tiivistelmä

Maapallon ilmasto on vaihdellut luonnollisesti kautta aikojen, mutta viimeisimmän vuosisadan aikana se on lämmennyt voimakkaimmin. Tämä lämpeneminen on seurausta ilmastomuutoksesta, jonka on tutkittu johtuvan ihmistoiminnan synnyttämistä kasvihuonekaasupäästöistä. Tällä muutoksella on vaikutusta ympäristöön, sillä ilmastolla on hallitseva rooli kasvillisuuden jakautumisessa maapallolla. Maapallon lämpenemisen odotetaan siirtävän kasvilajeja ja bioklimaattisia vyöhykkeitä korkeammille leveysasteille sekä vuoristoilla korkeammalle rinteillä. Tämän LuK-tutkielman tarkoitus on selvittää aiemman kirjallisuuden ja tapaustutkimusten avulla, miten ilmastomuutos vaikuttaa metsä- ja puurajoihin vuoristoilla. Monet tutkimukset viittaavat siihen, että vuoristojen elinympäristöt ovat herkimpiä ilmastomuutokselle globaalilla tasolla ja siksi ilmastomuutoksen vaikutukset näkyvätkin jyrkimmin ja nopeimmin juuri näillä yllä mainituilla alueilla. Ilmaston lämpeneminen on viime vuosisadan aikana saanut aikaan vaihtelevia muutoksia vuoristojen puurajoilla ympäri maapalloa – osa niistä on siirtynyt huimaa harppauksia korkeammalle, toiset taas eivät ole muuttuneet juuri lainkaan. Esimerkiksi Skandeilla puuraja on noussut, kun taas Afrikan ylänköalueilla se on pysynyt samalla korkeudella. Taustalla näihin eroihin vaikuttavat puun kasvua rajoittavat tekijät, jotka vaihtelevat eri vuoristoilla ja niiden osilla. Erot voivat myös johtua lämpötilan muutoksista, jotka ovat alueellisesti epäyhtenäisiä, sillä viime vuosisadan aikana osa maapallon alueista on viilentynyt lämpenemisen sijaan. Todennäköisemmin puuraja on kuitenkin liikkunut korkeammalle alueilla, joilla talven lämpötila on kohonnut voimakkaimmin. Näin ollen korkeat leveyspiirit ja niillä sijaitsevat vuoristot tulevat todennäköisemmin kohtaamaan suurimman muutoksen lämpötilojen kasvussa ja puurajan siirtymisessä.

Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Metsä- ja puurajat vuoristoilla	6
2.1. Metsä- ja puurajojen teoria	6
2.2. Puiden kasvuun vaikuttavia tekijöitä vuoristoilla	7
3. Ilmastomuutos	10
4. Ilmastomuutoksen vaikutukset metsä- ja puurajoihin	11
5. Ilmastomuutoksen vaikutukset esimerkkialueilla	12
5.1. Afrikan ylänköalueet	13
5.2. Alpit	15
5.3. Skandit	16
6. Tulevaisuus	18
6.1. Puu- ja metsärajojen tulevaisuus yleisesti	18
6.2. Lauhkea vyöhyke	20
6.3. Subtrooppinen vyöhyke	21
6.4. Trooppinen vyöhyke	23
6.5. Tulevaisuuden ennustaminen on vaikeaa	25

Lähteet

1. Johdanto

Ilmaston muuttuminen ei ole ilmiönä uusi, vaikka se onkin ollut kiivaimmin otsikoissa viime aikoina – ilmasto on aina vaihdellut luonnollisesti (Alley 2016: 151) sekä erilaisilla mittakaavoilla että aikaväleillä (Wong & Pape 2016: 5). Nämä luonnolliset heilahtelut ovat maapallon historian aikana aiheuttaneet ilmastossa niin ajoittaisia kuin jaksottaisia muutoksia, niin alueellisesti kuin maailmanlaajuisesti. Onkin hyvin mahdollista, että glasiaali- ja interglasiaalikaudet ovat seurausta näistä luonnollisista ilmastosykleistä (Wong & Pape 2016: 5). Toisin kuin historiassa, nykyisen ilmaston lämpenemisen, ilmastonmuutoksen, on tutkittu johtuvan ihmistoiminnasta peräisin olevista kasvihuonekaasuista (Marjakangas 2011: 11). Kuitenkaan siitä, paljonko ihmistoiminta maapalloamme lämmittää, ei ole tarkkaa tietoa – taustalla voi olla myös osaltaan luonnollisesti lämpenevä ilmasto (Wong & Pape 2016: 5). Yhdestä asiasta voimme kuitenkin olla varmoja. Nykyinen ilmastonmuutos on kiihtyvä ilmiö (Abrahamson 1989: 4). Viimeisimmän vuosisadan aikana keskilämpötilat ovat tästä syystä nousseet keskimäärin 1-3,5 celsiusastetta ja skenaariot vuoteen 2100 arvioivat lämpötilan nousevan vielä noin 1,4-5,8 celsiusasteen verran (Schneider 2001: 17).

Ilmastonmuutos vaikuttaa ympäristöön (Holtmeier 2009: 1), sillä ilmastolla on hallitseva rooli kasvillisuuden jakautumisessa maapallolla (Pearson & Dawson 2003: 361). Maapallon lämpenemisen odotetaan siirtävän kasvilajeja ja bioklimaattisia vyöhykkeitä korkeammille leveysasteille sekä vuoristoilla korkeammalle merenpinnasta (Holtmeier 2009: 1). Gairen ym. (2014: 1278) mukaan ilmastonmuutoksen vaikutukset näkyvätkin jyrkimmin ja nopeimmin juuri näillä yllä mainituilla alueilla. Todisteita kasvien reagoinnista lämpenemiseen löytyy menneisyydestä: Viimeisimmän jääkauden jälkeen, ilmaston lämmitessä, metsä- ja puurajat ovat siirtyneet yhä pohjoisemmaksi ja korkeammalle (Davis & Shaw 2001: 673), ja jatkavat yhä liikettään.

Monet tutkimukset viittaavat siihen, että vuoristojen elinympäristöt ovat herkimpiä ilmastonmuutokselle globaalilla tasolla. Vuoristojen metsäraja on selkein kasvillisuusraja mantereilla (lukuun ottamatta Etelämannerta) (Holtmeier 2009: 1) ja vuoristot peittävät kaikkia leveys- ja ilmastovyöhykkeitä (Diaz ym. 2003: 2) – tämän

vuoksi ne tarjoavat ainutlaatuiset mahdollisuudet havaita, mallintaa ja analysoida ilmastomuutosta ja sen vaikutuksia (Hofer 2005: 1). Lisäksi metsä- sekä puurajoista vuoristoilla on tallennettu historian aikana riittävän paljon tietoja (Holtmeier 2009: 1), sillä ne ovat kiinnostaneet tutkijoita yli sadan vuoden ajan (Körner 2012: 1; Malanson ym. 2011).

Tämän tutkielman tarkoituksena on luoda aiemman kirjallisuuden ja tapaustutkimusten avulla yhteenveto siitä, miten ilmastomuutos vaikuttaa metsä- ja puurajoihin vuoristoilla. Ensin tarkastelen yleisesti metsä- ja puurajoja vuoristoilla ja niihin vaikuttavia tekijöitä, jonka jälkeen käyn kolmen tapausesimerkin avulla läpi mitä metsä- ja puurajalle on konkreettisesti tapahtunut ilmastomuutoksen aikakautena. Tapausesimerkeiksi valitsin Afrikan ylänköalueet, Alpit ja Skandit. Nämä kolme aluetta valikoituivat esimerkeiksi siksi, että ne sijaitsevat suurin piirtein samalla pituuspiirillä, mutta leveyspiiriltään ne ovat aivan erilaisissa olosuhteissa ja siten vertailu alueiden välillä on mielekästä. Lopuksi käyn läpi yleisesti koko maapallon ja eri ilmastovyöhykkeiden metsä- ja puurajojen tulevaisuutta. Puukasvillisuusrajojen tutkiminen on kiinnostavaa, sillä etenevällä puu- ja metsärajalla on merkittäviä vaikutuksia globaaliin hiilenkiertoon – metsät toimivat hiilinieluina – ja biodiversiteettiin (Grace ym. 2002: 537).

Aiemman kirjallisuuden ja tapaustutkimusten perusteella pyrin tässä LuK-tutkielmassa vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Miten ilmastomuutos vaikuttaa metsä- ja puurajoihin vuoristoilla?
2. Vaikuttaako ilmastomuutos tasaisesti metsä- ja puurajoihin vuoristoilla maapalloa vai ovatko jotkin alueet toisia herkempiä?

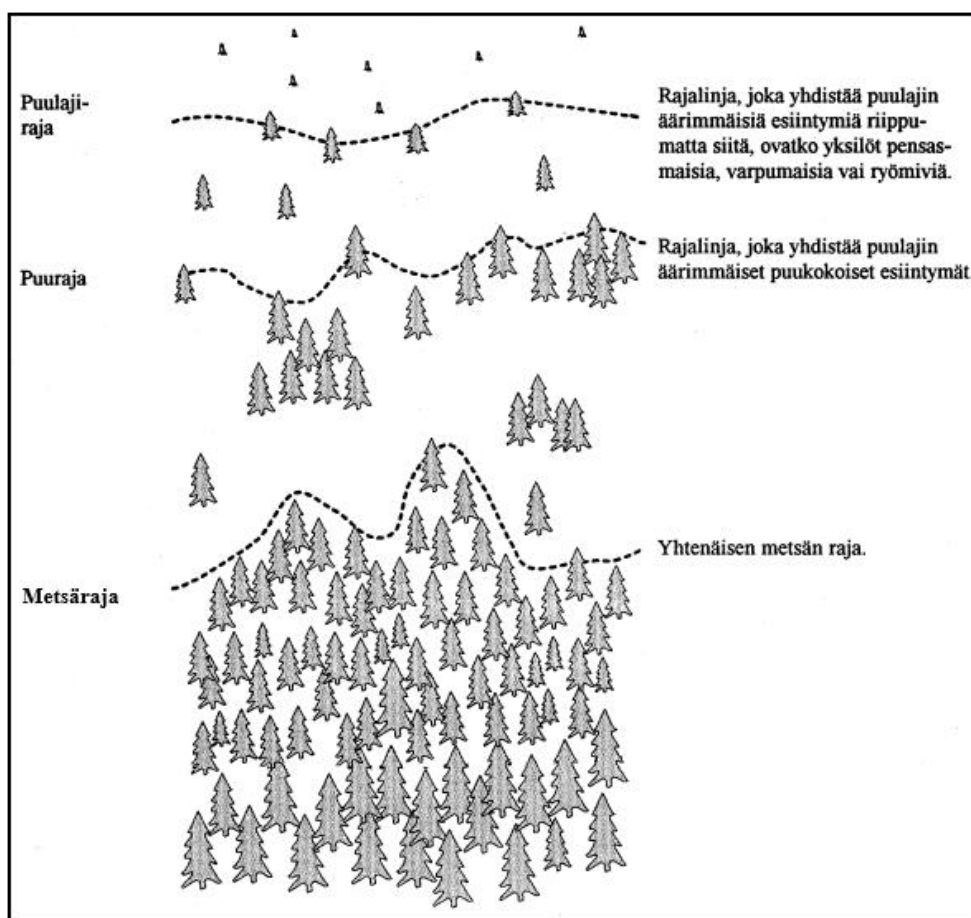
2. Metsä- ja puurajat vuoristoilla

2.1. Metsä- ja puurajojen teoria

Puuraja käsitteenä voidaan jakaa kahteen erilliseen käsitteeseen niiden sijainnin perusteella: korkeusvyöhykkeiden mukaan alpiiniseen ja leveysvyöhykkeiden mukaan pohjoiseen puurajaan (Holtmeier & Broll 2005: 395). Tässä tutkielmassa keskitymme näistä ensimmäiseen eli alpiiniseen puurajaan. Vuoristojen puurajat ovat yksi tunnistettavimmista ekotoneista eli kahden ekosysteemin vaihtumisvyöhykkeestä, jotka erottavat vuoristometsät niitä ylempänä sijaitsevasta tundrasta korkeilla leveysasteilla ja korkeilla vuoristoilla (Slatyer & Noble 1992: 346; Attrill & Rundle 2002: 929). Tundran sijaan päiväntasaajalla, trooppisella vyöhykkeellä, puuraja erottaa vuoristometsät ruohostoista (Arzac ym. 2019: 1).

Yleisimmät puukasvillisuusrajat ovat metsäraja ja puuraja. Metsäraja on yhtenäisen metsän raja eli siellä puiden latvusto on vielä yhtenäinen (Slatyer & Noble 1992: 346). Puurajalla tarkoitetaan taas rajaa, jossa puut saavuttavat vielä täysikasvuisuutensa. Tällä viitataan puiden minimipituuteen, joka vaihtelee lähteestä riippuen kahden ja kahdeksan metrin välillä eri puulajeilla (Holtmeier 2009: 11). Puurajan yläpuolella kasvillisuus muuttuu pensasmaisemmaksi ja puut kasvavat matalampina. Puulajiraja on vuoristoilla puukasvillisuusrajoista ylimpänä sijaitseva raja-alue, jolle puulaji on levinnyt, mutta kasvaa kitukasvuisena. Yleisesti metsärajalta korkeammalle siirryttäessä puiden korkeus ja tiheys pienenee ja pensaisuus lisääntyy, kunnes puulajiraja saavutetaan (Slatyer & Noble 1992: 346). Yllä mainitut puukasvillisuusrajat on esitelty kuvassa 1. Siellä, missä näitä rajoja esiintyy lämpö-, kuivuus-, vetisyys-, ravinto- tai suolapitoisuudet muuttuvat äkillisesti ja estävät metsien, puiden täysikokoisuuden tai koko lajin olemassaolon (Körner 1998: 445).

Joskus puu- ja puulajiraja ovat sama asia, kun täysikasvuisia puita kasvaa aina lajirajalleen saakka. Toisinaan myös metsäraja on sama kuin puu- ja puulajiraja riippuen vallitsevista olosuhteista. Monin paikoin rajat ovat siis vain sattuman suomia, eivätkä siis aiemmin esitetyn (kuva 1) mukaisia (Slatyer & Noble 1992: 347). Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa on käytetty ja huomioitu nämä kaikki kolme rajaa.



Kuva 1. Tasasen (1996: 291) mukaan yleisimmät metsä- ja puurajakäsitteet (tekijä muokannut).

2.2. Puiden kasvuun vaikuttavia tekijöitä vuoristoilla

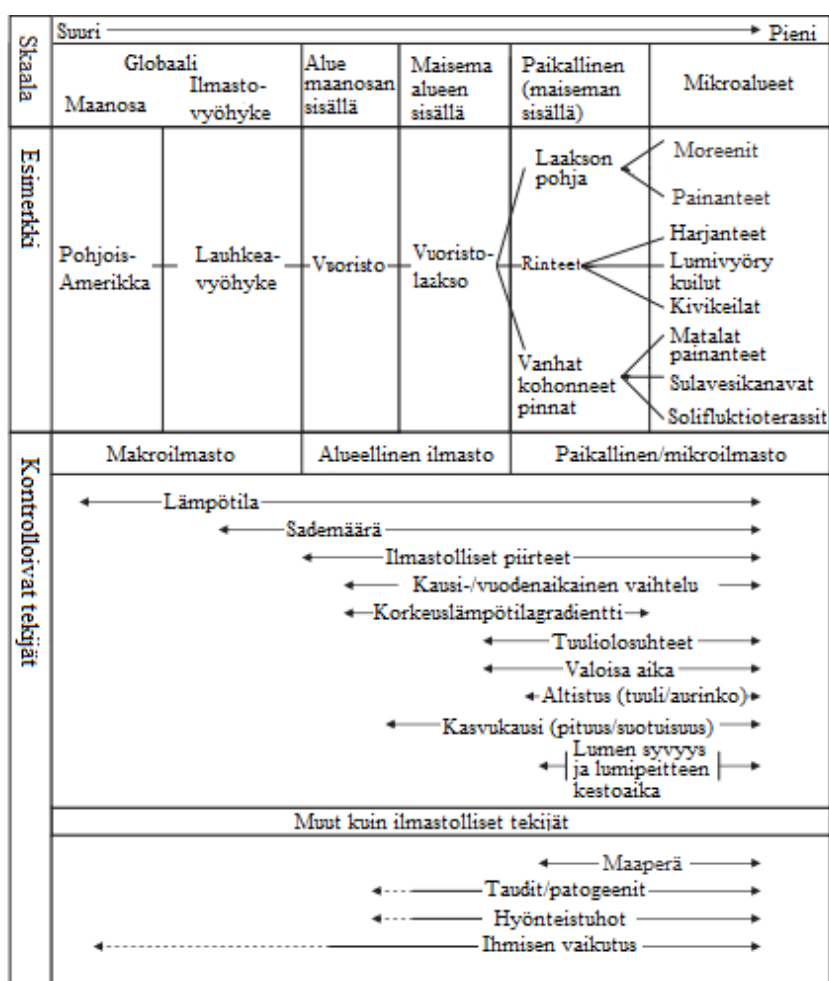
Vuoristot ovat ainutlaatuisia ekosysteemejä, jotka peittävät kaikkia leveys- ja ilmastovyöhykkeitä (Messerli & Ives 1997 Diaz ym. 2003: 2 mukaan). Ne muodostavat maapallon maapinta-alasta neljäsosan ja tarjoavat 26 prosentille maapallon väestöstä kodin ja elinympäristön (Diaz ym. 2003: 2). Vuoristoalueet sisältävät ekosysteemejä, jotka ovat haavoittuvaisia ja herkkiä luonnonriskeille, katastrofeille sekä ekosysteemimuutoksille, olipa kyse sitten nopeista massaliikunnoista tai ihmistoiminnasta (Messerli & Ives 1997 Diaz ym. 2003: 2 mukaan). Puurajan muodostumiseen vaikuttavat tekijät vuoristoilla voidaan jakaa kahteen ryhmään: yleisiin tekijöihin, jotka vaikuttavat kaikilla vuoristoilla maailmanlaajuisesti, ja muovaaviin tekijöihin, jotka vaikuttavat paikallisesti ja alueellisesti (Körner & Paulsen 2004: 714).

Kaikille vuoristoille on ominaista yhteiset ympäristörajoitteet, jotka estävät puiden kasvua tiettyä korkeutta ylempänä (Körner 2012: 1). Puurajaa hallitsee globaalilla tasolla enimmäkseen ilmasto (Bader 2007: 3; Malanson ym. 2011: 168). Ilmastotekijöistä lämpötila on tärkein rajoittava tekijä puurajan muodostumisessa (Körner & Paulsen 2004 Bader 2007: 3 mukaan). Puurajan onkin todettu vastaavan lämpötilagradienttia, missä vuoden lämpimimmän kuukauden keskilämpötila on noin 10 celsiusastetta. Lämpövajeen rajoittava rooli heijastuu selvästi puurajan laskuun vuoristojen rinteillä tropiikin alueelta kohti napoja sekä puiden pituuden lyhentymisessä kohti puurajaa (Holtmeier & Broll 2007: 2). Täten päiväntasaajan lähellä sijaitsevilla vuoristoilla puuraja kasvaa lämpötilan puolesta korkeammalla ja esimerkiksi Uuden-Guinean Wilhelm-vuorella puuraja on jopa 3850 metrin korkeudella. Napapiirien lähellä lämpötilan ollessa kylmempi, puuraja on paljon matalampana, kuten Pohjois-Ruotsissa Skandeilla noin 680 metrin korkeudella (Körner 1998: 448). Korrelaatio ilman lämpötilan ja puiden kasvun välillä ei kuitenkaan ole suoraviivainen, sillä maaperän lämpötila ei ole sama kuin ilman lämpötila (Grace ym. 2002: 537).

Holtmeierin ja Brollin (2005) mukaan lisäksi ilmastolliset tekijät, kuten sademäärä ja kasvukauden pituus, vaikuttavat globaalisti kaikkien vuoristojen puurajojen sijaintiin. Korkeussuuntaisen eli alpiinisen puurajan sijainti on tulosta lämpötilan viilenemisestä ja tästä johtuvan kasvukauden lyhentymisestä korkeuden lisääntyessä (Holtmeier 1965 Malanson ym. 2011: 168 mukaan). Valoisa aika rajoittaa puiden kasvua lähinnä kasvukauden lyhytenä korkeilla leveysasteilla, sillä muihin elämämuotoihin nähden puut ovat ympäristössään kilpailukykyisimpiä pituutensa ansiosta valon saannin suhteen (Körner 2012: 11). Muita globaalisti rajoittavia tekijöitä ovat muun muassa ihmisen toiminnasta syntyvät rajoitteet, kuten metsien hakkuut (Holtmeier & Broll 2005).

Kuitenkin alueellisella ja paikallisella tasolla puurajat eivät ole yhdenmukaisia yksittäisten isotermien kanssa, sillä puurajaa hallitsevat näillä tasoilla yhdistelmätekijät, kuten esimerkiksi ilmaston, kasvualustan, häiriöiden ja maankäytön yhdistelmät (Holtmeier & Broll 2005). Puiden kasvun taustalla vaikuttaakin joukko erilaisia bioottisia ja abioottisia tekijöitä (Blanco 2009: 1). Holtmeierin ja Brollin (2005) mukaan tällaisia alueellisia ja paikallisia abioottisia tekijöitä ovat muun muassa maaperän koostumus, altistus tuulelle tai auringolle sekä lumipeitteen syvyys ja paksuus.

Esimerkiksi maaperässä esiintyvän typen saatavuudella on vaikutusta puiden kasvuun ja kehitykseen yhdessä lämpötilan, sademäärän ja valon kanssa (Kellomäki ym. 2007). Bioottisia rajoittavia tekijöitä ovat muun muassa patogeenit, hyönteiset ja erilaiset taudit (Malanson 2011: 170). Holtmeierin ja Brollin (2007: 5) mukaan puurajoihin vaikuttavat lisäksi niin primaarinen kuin sekundaarinen sukkessio, kilpailu, luonnolliset ja ihmisen aiheuttamat tulipalot, myrskyt, erittäin lumiset ja lumettomat talvet, kuivuus ja muut ääri-ilmiöt ja massaliikunnot. Kuvassa 2 on esitelty puurajaan eri skaaloilla vaikuttavat tekijät. Rajoittavat tekijät riippuvat myös topografiasta ja siten ne voivat vaihdella paljon paikallisesti (Holtmeier & Broll 2007: 20). Alueellisella ja paikallisella tasolla vaikuttavienkin tekijöiden taustalla vaikuttaa kuitenkin aina ilmastolliset tekijät, lähinnä lämpötila (Malanson 2011: 170).



Kuva 2. Holtmeierin ja Brollin (2005: 396) mukaan puurajaan vaikuttavat tekijät eri mittakaavoilla (tekijän muokkaama ja suomentama).

3. Ilmastonmuutos

Maapallolla ilma, vesistöt ja maa-alueet ovat kaikki yhteydessä toisiinsa ilmakehän kaasujen vaihdon kautta. Nämä kaasunvaihtoprosessit määrittelevät suuresti maapallon ilmastoa, joka on vaihdellut luonnollisesti läpi maapallon olemassaolon. Viimeisimmän 50-100 vuoden aikana on kuitenkin tapahtunut huomattava muutos: lämpeneminen on ollut suurinta ja nopeinta ihmisen historian aikana. Maapallo on lämmennyt viimeisen 300 vuoden aikana, mutta suurin huomio tilastoja katsellessa kohdistuu viimeisimmän sadan vuoden aikana tapahtuneelle muutokselle (Jozefat 2016: 62). Viime vuosisadan aikana keskilämpötilat ovat nousseet keskimäärin 0,72 celsiusastetta (Fang ym. 2011: 1).

Ilmastonmuutos on seurausta ihmistoiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä, jotka estävät auringon säteilyenergian karkaamista ilmakehästä avaruuteen sitomalla sitä yhä lisääntyvissä määrin maapallon ilmakehään (Marjakangas 2011: 11; Bio-Brief#2... 2013; Jozefat 2016: 61-62). Tällaisia yleisimpiä ilmastoamme lämmittäviä kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO_2), otsoni (O_3), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O) ja CFC-yhdisteet (Oksanen 2004: 41). Näitä kaasuja vapautuu esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käytöstä (eli suurimmaksi osaksi liikenteestä), teollisuudesta, metsien hakkuista sekä ruuantuotannosta yhä kasvavalle ihmisväestölle (Abrahamson 1989: 4; Oksanen 2004: 41).

Auringon säteilyenergian sitoutuminen maapallon ilmakehään aiheuttaa ilmaston lämpenemistä (Jozefat 2016; Fang ym. 2011). Ilmaston lämpenemisellä tarkoitetaan maapallon ilmakehän lämpötilan asteittaista nousua, joka johtuu yleensä voimistuneesta kasvihuoneilmiöstä (Jozefat 2016: 61-62). Ilmaston lämpenemisen johdosta maanpinta lämpenee nopeammin verrattuna meriin. Lisäksi korkeat leveyspiirit ja vuoristot tulevat kohtaamaan suurimman muutoksen lämpötilojen kasvussa (Jozefat 2016: 63; Gaire ym. 2014: 1278). Näillä alueilla puurajojen aseman uskotaan yleisesti olevan lämpötilaherkkiä ja reagoivan ilmaston lämpenemiseen (Holtmeier & Broll 2005 Harsch ym. 2009: 1040 mukaan). Ilmastonmuutos tulee muuttamaan myös sademääriä ja sateen jakautumista maapallolla (Oksanen 2004: 41), ja siksi kosteusolot muuttuvat yhä kärjistetyimmiksi sään ääri-ilmiöiden yleistyessä (Diaz ym. 2003: 2).

4. Ilmastonmuutoksen vaikutukset puu- ja metsärajoihin

Ilmastonmuutos vaikuttaa metsiin sekä suoraan että välillisesti (Dale ym. 2000: 201). Ilmastonmuutoksesta johtuvat erilaiset ilmiöt, kuten muutokset lämpötilassa, sademäärissä ja ilmakehän kaasukoostumuksessa vaikuttavat voimakkaasti puiden kasvuympäristöihin ja täten puurajan sijaintiin (Oksanen 2004: 41).

Ilmastonmuutoksessa on ainakin kolme tunnistettua ympäristönmuutokseen vaikuttavaa tekijää, joihin kasvit reagoivat: lämpötilan nousu sekä hiilidioksidi- ja typpipitoisuuden kasvu. Vaikuttaa kuitenkin epätodennäköiseltä, että hiilidioksidin ja muiden fotosynteesiä nopeuttavien pitoisuuksien lisääntyminen ilmassa olisi päätekijä kasvillisuuden muutoksiin. Sen sijaan lämpötila näyttäisi olevan ensisijainen tekijä puurajan muodostumisessa (Grace ym. 2002: 537). Gracen ym. (2002: 539) mukaan vuoristojen puurajalla kasvavat puut eivät reagoi tuntuvasti hiilidioksidipitoisuuden kasvuun, sillä niillä ei ole puutetta tästä fotosynteesin ainesosasta. Runsaat hiilidioksidimittaukset vahvistavat, ettei hiilidioksidipitoisuuden kasvu ole globaalisti merkitsevä tekijä puurajan siirtymisessä, mutta paikallisesti se voi olla (Cairns & Malanson 1997 Malanson ym. 2011: 168 mukaan). Körnerin (2003) hypoteesi onkin, että jatkuva hiilidioksidipitoisuuden kasvu ei edistä puiden kasvua ja puurajan etenemistä maailmanlaajuisesti. Hiilidioksidi- ja typpipitoisuuden lisäksi myös otsonipitoisuus kasvaa ilmastonmuutoksen vaikutuksesta. Otsoni on puiden kasvun kannalta merkittävin kaasumainen ilmansaaste ja sen pitoisuus on ilmastonmuutoksen takia kasvanut maapallolla. Otsoni on kasveille myrkyllistä ja esimerkiksi puilla se johtaa neulas- tai lehtivaurioihin, jotka taasen johtavat fotosynteesin ja ravinteiden talteenoton vajaavaisuuteen. Jälkimmäinen voi pitkällä aikavälillä johtaa heikentyneeseen kylmän sietokykyyn (Matyssek & Sander mann 2003 Oksanen 2004: 43 mukaan).

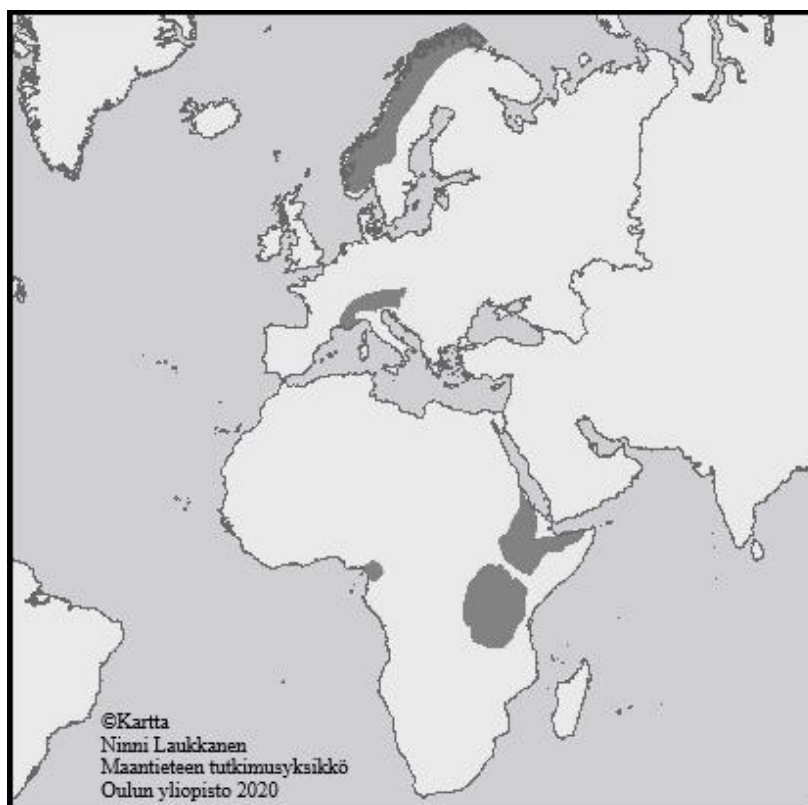
Harschin ym. (2009) mukaan puurajat ovat lämpötilaherkkiä siirtymävyöhykkeitä, joiden odotetaan reagoivan ilmaston lämpenemiseen etenemällä nykyisen sijaintinsa ulkopuolelle. Erityisesti vallitsee näkemys, että alpiinista puurajaa hallitaan kesälämpötilalla (Holtmeier & Broll 2007). Gracen ym. (2002: 537-539) mukaan puurajat tulevat ilmastonmuutoksen aiheuttaman lämpenemisen johdosta muuttumaan, koska lämpimämpi ilmasto lisää solunjakautumisnopeutta ja täten nopeutta

hyödyntää sitoutunutta hiiltä. Samaan aikaan tämä lämpeneminen myös pidentää kasvukautta, ja jo lyhyelläkin kasvukauden pidentymisellä on huomattavasti suurempi vaikutus puiden esiintyvyyteen vuoristoilla verrattuna alangoilla kasvaviin puihin. Vuoristoekosysteemien erityisenä piirteenä onkin monimutkaisesta topografiasta johtuvat jyrkät lämpötilagradientit. Ilmastonmuutoksen johdosta metsäpeitteen odotetaan siirtyvän ylöspäin lämpötilan noustessa (Grace ym. 2002: 537-539). Suuret korkeus- ja kaltevuuserot tekevät vuoristoekosysteemeistä erittäin alttiita pienillekin lämpötilanmuutoksille ja rankkasateille (Diaz ym. 2003: 3). Ilmastonmuutos tulee myös korvaamaan vuoristojen tundrakasvillisuutta puukasvillisuudella (Malanson ym. 2011: 167).

Ilmastonmuutos vaikuttaa puiden kasvuun myös välillisesti erilaisten häiriöiden, kuten metsäpalojen, kautta. Häiriöt ovat luonnollinen osa metsäekosysteemejä, mutta ilmastonmuutos voi muuttaa niiden esiintyvyyttä (Dale ym. 2000: 201). Viimeaikaisten biologisten muutosten määrittelemineen on monimutkaista yhdistää suoraan ilmastonmuutokseen, sillä muutkin kuin ilmastolliset tekijät vaikuttavat hallitsevan paikallisia, lyhytaikaisia muutoksia kasvillisuudessa (Parmesan & Yohe 2003: 37). Mutta jos oletetaan, että metsä- ja puurajoja hallitsee ilmastolliset tekijät, kuten lämpötila, voidaan niiden muutokset ennustaa. Ilmastonmuutoksessa on kuitenkin olemassa myös ilmastollisia tekijöitä, kuten auringonsäteilyn kasvua, joiden vaikutuksia kasvillisuuteen ei kuitenkaan tiedetä (Grace ym. 2002: 537).

5. Ilmastonmuutoksen vaikutukset esimerkkialueilla

Tutkielman esimerkkialueina ovat Afrikan ylänköalueet, Alpit ja Skandit (kuva 3). Nämä alueet sijaitsevat kaikki suurin piirtein samalla pituuspiirillä, mutta leveyspiiriltään ne eroavat toisistaan. Tämän vuoksi niiden rinteillä kasvavilla puilla rajoittavat tekijät eroavat osittain toisistaan. Seuraavaksi käydään lyhyesti läpi näiden kolmen esimerkkialueen puurajoja, puulajeja ja niissä tapahtuneita muutoksia.



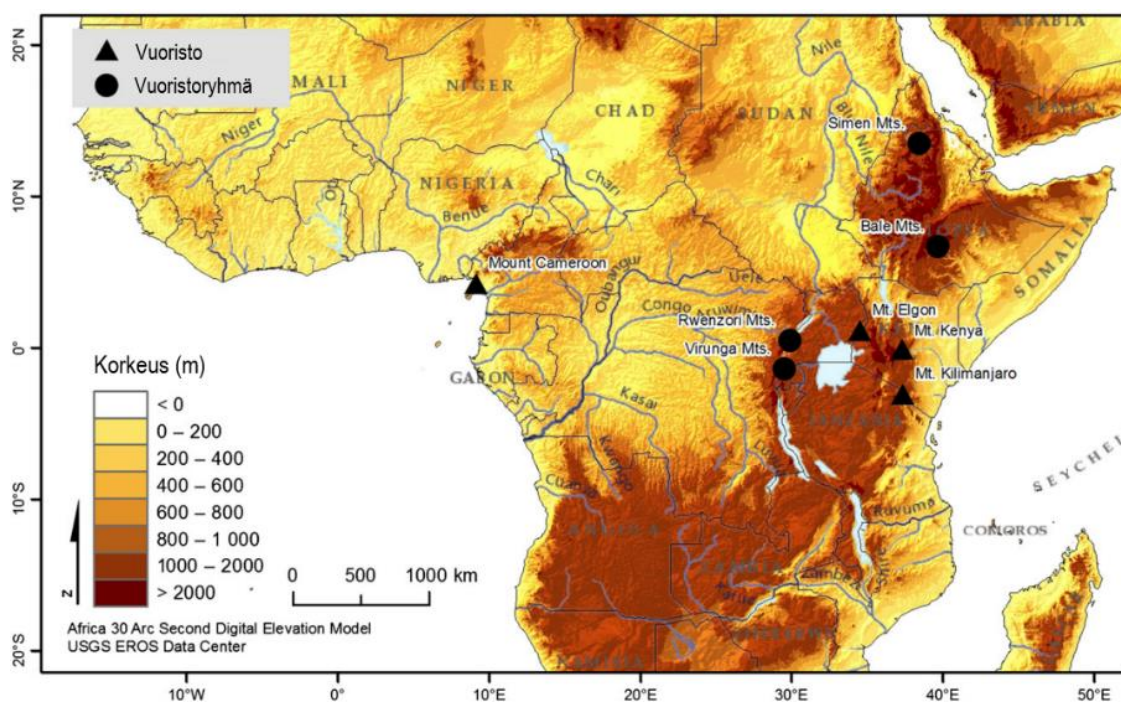
Kuva 3. Esimerkkialueet tummanharmaalla esitettynä: pohjoisimpana Skandit, keskimmäisenä Alpit ja Afrikan yläköalueet (kolme erillistä aluetta) päiväntasaajan tuntumassa.

5.1. Afrikan yläköalueet

Jacob ym. (2015) ovat tutkineet Afrikan yläköalueiden puurajan muutoksia. Heidän tutkimuksensa keskittyy Afrikan vuoristoihin, joista on tehty jo aiempia puurajatutkimuksia. Nämä vuoristot ovat nimeltään Rwenzori Mountains, Virguna Mountains, Simen Mountains, Bale Mountains, Mount Elgon, Mount Kilimanjaro, Mount Kenya ja Mount Cameroon (kuva 4). Kaikkien näiden vuoristojen puurajan ekotonit muodostuvat *Ericoideae*-alaheimon puista, joista suurin osa on *Erica L* –sukuisia puita (Miehe & Miehe 1994; Wesche ym. 2000 Jacob ym. 2015 mukaan). Nämä puut ovat pieniä, noin kahdeksan metrisiä, ja niissä on neulamaisia sklerofyllilehtiä (Jacob ym. 2015: 11). Huolimatta rajallisesta kasvualueesta, tämä metsätyyppi on Afrikan trooppisten yläköjen alueelliselle ympäristölle tärkeä (Miehe & Miehe 1994 Jacob ym. 2015 mukaan).

Jacobin ym. (2015: 9) mukaan ilmastollisten tekijöiden vaikutus Afrikan trooppisilla ylängöillä on erilainen verrattuna muihin yläköalueisiin. Puurajan jakautumista määrittävät potentiaalisesti lämpötila, sademäärä, pilvisuus, hiilitasapaino, tulipalot sekä ihmis- ja eläinperäiset vaikutukset. Afrikan mantereen lämpötila on viimeisimmän sadan vuoden aikana noussut noin 0,5 celsiusastetta (Hulme ym. 2001: 149). Hulmen ym. (2001) mukaan Itä-Afrikan sademäärät ovat vuosien varrella olleet melko vakaita, kun taas Länsi-Afrikan ja Guineanlahden sateet ovat vähentyneet selvästi.

Viimeaikaisesta lämpötilannoususta huolimatta puuraja ei ole noussut korkeammalle Afrikan trooppisilla ylängöillä. Sen sijaan, ihmistoiminnan aiheuttama paine, kuten esimerkiksi karjanlaidunnus, on aiheuttanut puurajojen vakiintumista ja osittain jopa taantumista niiden luonnollisen ilmastorajan alapuolelle (Jacob ym. 2015). Puurajan muutoksen todelliset vaikuttajat Afrikan trooppisilla vuoristoilla ovat enemmän tulipalot ja ihmistoiminta kuin ilmastomuutos, mutta ilmastomuutoksesta seuraavat pitkäaikaiset kuivuusjaksot voivat laukaista metsiä tuhoavia tulipaloja. Lisäksi aktiivisilla tulivuorilla on myös potentiaalisesti rajoittavia vaikutuksia puurajan jakautumiseen alueella (Jacob ym. 2015: 9).



Kuva 4. Jacobin ym. (2015: 11) tutkimat yläköalueet Afrikassa. Kartan mustat kolmiot ja ympyrät esittävät tutkittuja vuoristoja ja vuoristoryhmiä (kartta osittain tekijän suomentama).

5.2. Alpit

Gehrig-Fasel ym. (2007) ja Leonelli ym. (2011) ovat tutkineet Alppien puurajan muutosta. Tutkimukset on suoritettu Sveitsin Alpeilla (kuva 5), jonka topografia on monipuolista ja maisema hyvin pirstoutunutta. Alpit luovat topografisen esteen sateiden liikkeelle, sillä ne muodostavat lännestä itään yhtenäisen vuoriston (Gehrig-Fasel ym. 2007: 573). Tästä johtuen Pohjois-Alpeilla vallitsee meri-ilmastoa, jota kuvastaa yleensä kostea, kesällä viileä ja talvella kohtalaisen kylmä, ilmasto. Alppien keskellä ilmastolle on ominaista mannermaisuuksia eli kuumat ja kuivat kesät yhdistettynä kylmiin talviin. Etelä-Alppien ilmasto on enemmän välimerenilmaston kaltainen, missä kesät ovat kuumia ja osittain kuivia, mutta ajoittain esiintyy rankkasateita; talvet kohtalaisen kylmiä ja kosteita (Gehrig-Fasel ym. 2007: 573).

Nämä pienimuotoiset ilmaston moninaisuudet johtavat merkittäviin kasvillisuuden eroihin lyhyilläkin etäisyyksillä. Pohjois-Sveitsin hallitseva puulaji on metsäkuusi (*Picea abies*), jonka lisäksi alueella kasvaa myös pihlajaa (*Sorbus aucuparia*) ja pensasleppää (*Alnus viridis*). Alppien kuivissa sisälaaksoissa hallitsevat lajit ovat euroopanlehtikuusi (*Larix decidua*) ja sembramänty (*Pinus cembra*). Etelä-Alpeilla euroopanlehtikuusi ja metsäkuusi hallitsevat maisemaa korkeimmilla metsäalueilla (Gehrig-Fasel ym. 2007: 573).



Kuva 5. Gehrig-Faselin ym. (2007: 572) tutkimusalue, Sveitsin Alpit, kuvassa tummanharmaalla (kartta tekijän suomentama).

Alpeilla lämpötilan nousu on ollut voimakkaampi viimeisen vuosisadan aikana kuin keskimääräinen lämpötilan kohoaminen maapallolla (Hansen ym. 2006 Leonelli ym. 2011: 264 mukaan). Erityisesti Sveitsissä on havaittu erittäin voimakas lämpeneminen ajanjaksolla 1975-2004, jolloin lämpötila nousi 1,7 celsiusasteella (Rebetez & Reinhard 2008: 29). Vaikka Gehrig-Faselin ym. (2007) tutkimuksen ajanjakso oli 12 vuotta, tapahtui tällä pienellä jaksolla huomattavia muutoksia. Alueen puurajalla on tapahtunut merkittävää metsien kasvua – tosin tämä muutos johtuu suurimmaksi osaksi pelkästään jo aiemmin kasvaneiden taimien kasvusta täysikokoisiksi, ei niinkään puurajan liikkeestä korkeammalle. Puulaji itsessään ei siis ole juurikaan liikkunut: männyn puulajirajasta on vain tullut puuraja ja pikkuhiljaa metsäraja. Tutkimuksessa selvinnyt 90 prosentin metsikön kasvu puurajalla ja sen läheisyydessä osoittaa, että metsien laajentumisen rajoitukset ovat muuttuneet huomattavasti viime aikoina puiden reagoidessa välittömästi täyttämällä metsien puuttomat aukot.

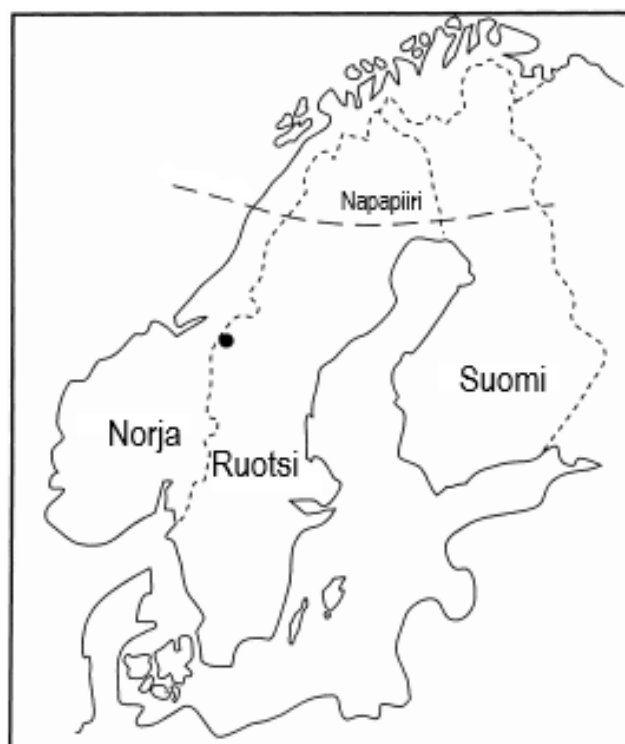
5.3. Skandit

Kullman (2007) on tutkinut männyn (*Pinus sylvestris*) puurajan muutosta Ruotsin Skandeilla Handölan laaksossa (kuva 6). Kasvimaantieteellisesti Skandit kuuluvat boreaaliseen vyöhykkeeseen (Ahti ym. 1968 Kullman 2007: 42 mukaan) ja alueella vallitsee väli-ilmasto (Kullman 2007: 42). Tutkimuksen seurantajakso sijoittuu ajanjaksolle 1973-2005 ja tällä aikavälillä valitun mäntypopulaation koko kasvoi 50 prosenttia: mänty onkin tullut näkyvämmäksi maisemassa. Männyn tulevaisuus riippuu koivun tulevaisuudesta, sillä nämä puulajit kilpailevat keskenään. Tulevaisuudessa kuivemmat kesät suosivat koivujen sijaan mäntyjä (Kullman 2005 Kullman 2007: 50 mukaan).

Rannow (2013) on tutkinut myös Skandeilla tapahtuvaa puurajan muutosta Norjan lounaisosassa sijaitsevassa Hardangerviddassa, joka on Euroopan suurin vuoristotasanko ja sen korkeus vaihtelee 1100 metristä 1300 metriin merenpinnan yläpuolella. Tällä alueella korkeimman puurajan muodostaa hieskoivu (*Betula pubescens*) (Väre 2001 Rannow 2013: 575 mukaan). Norjanmeren läheisyyden vuoksi Skandien tällä alueella ilmasto on melko kostea ja merellinen (Kullman 2002: 69).

Hardangerviddassa tehdyt lämpötilamittaukset paljastavat, että kauden 1955-2004 talvilämpötilat ovat nousseet selvästi, kun taas kevät- ja kesäkuukausien lämpeneminen on ollut noin 0,78 celsiusastetta. Rannow (2013) tutkimuksessa havaittu puurajan siirtyminen on kuitenkin pienempi kuin paikallinen ilmaston lämpeneminen ja maankäytön muutokset antaisivat olettaa.

Yleisessä kuvassa hieskoivun, metsäkuusen, männyn, pihlajan ja pajun (*Salix spp.*) puurajat ovat edenneet 1950-luvulta lähtien noin 120-375 metriä Skandeilla (Kullman 2002). Talven keskilämpötilojen nouseminen on vaikuttanut eniten tähän muutokseen (Kullman 2007: 42), mutta Moen ym. (2004) mukaan myös kesälämpötilojen muutos vaikuttaa taustalla. Vuoden 1988 jälkeen talvet ovat lämmenneet voimakkaasti ja jatkuvasti alueella, mikä lämpimämpien kesien kanssa on pakottanut kasvillisuutta mukautumaan muutokseen. Kesän vähentynyt lumipeite vuoristoilla on suosinut taimien ja nuorten puiden kasvua; leudot talvet parantavat näiden selviytymistä seuraavaan kasvukauteen (Kullmanin 2002). Lisäksi tämän alueen sademäärät ovat lisääntyneet tasaisesti viime vuosisadan ajan (Kullman 2007: 45). Ihmisten aiemmat ja nykyiset vaikutukset alueen puurajaan näyttäisivät olevan vähäisiä Skandeilla (Kullman 2007: 42).



Kuva 6. Kullmanin (2007: 43) tutkimusalueen sijainti kartalla (kartta tekijän suomentama).

6. Tulevaisuus

6.1. Puu- ja metsärajojen tulevaisuus yleisesti

Tutkittaessa metsä- ja puurajoja on hyvä muistaa, että metsärajan eteneminen vuoristoilla riippuu ensisijaisesti puiden uudistumis- ja selviytymiskyvystä (Holtmeier & Broll 2007: 12). Yleensä regeneraatioprosessi korreloi positiivisesti useiden peräkkäisten suotuisien vuosien lämpöolosuhteiden kanssa – lämpimämpi kesä suosii todennäköisemmin elinkelpoisten siementen tuotantoa, taimien kasvua ja siten puiden etenemistä vuoristoilla (edellyttäen, että muut tekijät eivät rajoita kasvua) (Holtmeier & Broll 2007: 12). Taimien selviämistä onkin ollut yleensä alhainen vuoristojen puurajoilla ensimmäisten itämisen jälkeisten vuosien aikana, mutta tämä voi muuttua tulevaisuuden lämpimämmässä ilmastossa (Mellmann-Brown 2002 Holtmeier & Broll 2007: 12 mukaan).

Harschin ym. (2009) mukaan ilmaston lämpeneminen viime vuosisadan aikana on saanut aikaan vaihtelevia muutoksia vuoristojen puurajoilla ympäri maapalloa – osa puurajoista on siirtynyt huimia harppauksia korkeammalle, toiset taas eivät ole muuttuneet juuri lainkaan. Tästä hyvänä esimerkkinä ovat esimerkkialueet: Skandeilla puuraja on noussut (Kullman 2002; Kullman 2007; Rannow 2013), kun taas Afrikan ylänköalueilla ei (Jacob ym. 2015). Tällaiset erot voivat johtua lämpötilan muutoksista, jotka ovat alueellisesti epäyhtenäisiä (Harsch ym. 2009: 1041), sillä viime vuosisadan aikana osa maapallon paikoista ja alueista on viilentynyt lämpenemisen sijaan (Körner 2007 Harsch ym. 2009: 1041 mukaan). Tämän vuoksi yksittäisillä vuoristoilla tai vuoristojen rajatulla alueella tehtyjä tutkimuksia ei pitäisi suoraan yleistää koskemaan kaikkia maailman vuoristoja. Kuitenkin todennäköisemmin puuraja on liikkunut korkeammalle alueilla, joilla talven lämpötila on kohonnut voimakkaimmin, ja joilla puuraja on hajanainen. Hajanaiset puurajat reagoivat enemmän lämpenemiseen, koska niiden kasvu on eniten rajoitettua lämpötilan johdosta (Harsch ym. 2009). Varsinkin Skandeilla tapahtunut puurajanmuutos tukee tätä talvilämpötilan kohoamisen ja puurajan välistä korrelaatiota. Näin ollen Skandien puurajan muutos on perusteltua, sillä talven lämpötilat ovat Skandien alueella nousseet voimakkaasti; kun taas Afrikan ylänköjen puurajan vakiintuminen tietylle korkeudelle on ymmärrettävää, sillä tämän alueen puurajan siirtymistä ei rajoita lämpötila.

Parmesanin ja Yohen (2003) mukaan globaaleissa metatutkimuksissa on dokumentoitu, että ilmastonmuutos tulee keskimäärin siirtämään kasvillisuutta ja eläimistöä noin 6,1 kilometriä navoille päin vuosikymmenessä ja 6,1 metriä korkeammalle rinteillä samalla ajanjaksolla sekä kevät saapuu keskimäärin 2,3 päivää aiemmin vuosikymmenessä. Tällainen muutos tulee todennäköisesti hyödyttämään keski- ja korkeiden leveysasteiden puurajoja eniten, sillä ilmasto, etenkin lämpötila ja siitä riippuvainen kasvukauden pituus, tulee muuttumaan alueen puille suotuisammaksi.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset puurajoihin eivät kuitenkaan ole yksiselitteisiä. Tulevaisuuden lämpimämmässä ilmastossa puupopulaatioiden lisääntyminen voi alueellisesti lisätä lumipeitteen paksuutta talvella, sillä puurajojen ekotoneissa lumen kerääntyminen on suurempaa verrattuna tiheisiin metsiin. Lumipeitteen paksuuntuminen voi osaltaan parantaa taimien selviytymistä etenkin kuivina vuosina ja kuivemmilla alueilla (Smith ym. 2003 Holtmeier & Broll 2007: 16 mukaan). Toisaalta pidempiaikainen lumipeite voi lyhentää taimien kasvukautta, lisätä sieni-infektoriskiä ja madaltaa puurajaa lumivyöryjen takia (Holtmeier & Broll 2007: 16; Troll 1973: 4). Lisäksi mekaaniset vahingot lumikuormituksesta ovat todennäköisemmät lumipeitteen paksuuntuessa (Seki ym. 2005 Holtmeier & Broll 2007: 16 mukaan). Jos lumipeite ohenee, joko vähälumisempien talvien tai tuulen vuoksi, puuesiintymät vuorilla vetäytyvät alemmas rinteillä tai häviävät kokonaan (Troll 1973: 4). Näin ollen lämpenemisestä ei seuraa vain tietyn suuntaisia muutoksia, vaan toisilla alueilla puuraja saattaa taantua nykyistä alemmaksi.

Lisäksi useat tutkijat ovat havainneet maan hylkäämisen yhteyden metsien uudelleenkasvuun vuoristoisilla alueilla (Walther 1986; Mather & Fairbairn 2000). Ihmisten hylkäämillä alueilla puut jatkavat nopeaa tilan valtaamista (Holtmeier & Broll 2007: 11). On luonnollista, että metsien kasvaessa rauhassa ilman ihmisten aiheuttamia ylimääräisiä häiriöitä, ne valtaavat nopeasti suotuisat kasvualueet itselleen. Tämä käy ilmi Alpeilla tehdyistä tutkimuksista – tosin Alpeilla metsä on vain tihentynyt eli täyttänyt puuttomat aukot, ei niinkään laajentunut korkeammalle vuoristolla (Gehrig-Fasel ym. 2007; Leonelli ym. 2011). Täten voidaan todeta, että puurajat, joihin pastoraalinen käyttö tai muunlainen ihmistoiminta on vaikuttanut vuosisatojen ajan, reagoivat ilmaston lämpenemiseen eri tavalla kuin häiriöttömät puurajat (Holtmeier & Broll 2007: 11).

Esimerkkisi Afrikan ylänköalueilla ihmisen puun tarpeen ja laidunnuksen takia puuraja ei ole noussut ilmastonmuutoksen vaikutuksista huolimatta (Jacob ym. 2015). Seuraavassa kolmessa kappaleessa käsitellään lyhyesti, mutta tarkemmin puukasvillisuusrajojen tulevaisuutta eri ilmastovyöhykkeillä.

6.2. Lauhkea ja kylmä vyöhyke

Lauhkean vyöhykkeen alueella, jossa lämpötilavaihtelut talven ja kesän välillä ovat suuret, puiden kasvua rajoittavat pääosin kesäolosuhteet – esimerkiksi lämpimimmän kuukauden keskilämpötila ja kasvukauden pituus. Kylmien talvien alueilla puurajaan vaikuttavat kesäolojen lisäksi myös lumipeitteen paksuus ja lumettomuus (Troll 1973: 4). Yksi maailman ekosysteemien tärkeimmistä kynnysarvoista on nollan celsiusasteen raja: tätä rajaa kylmemmissä olosuhteissa vesimolekyylit esiintyvät kiinteässä muodossa. Erityisesti keski- ja korkeilla leveysasteilla tällä kynnysarvolla on vahva merkitys vuoristoalueilla, olipa kyse niin lyhyestä (kylmistä talvista) kuin pitkästä aikavälistä (jopa vuosisatoja kestävät ikiroudat ja jäätiköt). Pienet lämpötilamuutokset nollan celsiusasteen kynnyksellä vaikuttavat erilaisiin ympäristöihin kuten jäätiköihin, lumi- ja jääpeitteisiin alueisiin sekä ikiroutaisiin maihin, joiden pinta-alat pienenevät ilmastonmuutoksen lämmittäessä planeettaamme (Kullman 2002: 68; Diaz ym. 2003: 3). Tällaisten alueiden pieneneminen mahdollistaa varsinkin keski- ja korkeilla leveysasteilla puiden leviämisen uusille alueille, joten uskon puurajojen muuttuvan tällä alueella eniten. Samaan aikaan ilmastonmuutos tulee myös syrjäyttämään toisia lajeja – esimerkiksi Suomen tuntureilla männyn puuraja on noussut jo huimasti koivun puurajan tuntumaan (Holtmeier & Broll 2007: 4). Tällä ympäristönmuutoksella on tulevaisuudessa suuri merkitys maailman biodiversiteetin vähenemisen kanssa, sillä useat kasvit ja eläimet ovat vaarassa kuolla sukupuuttoon esimerkiksi tundra-alueiden pienentyessä.

Skandeilla Moen ym. (2004) mukaan ilmastoskenaariosta riippuen puurajat tulevat siirtymään noin 233-667 metriä korkeammalle seuraavan vuosisadan aikana. Tämä tarkoittaisi siis keskimäärin noin 20-60 metrin siirtymää vuosikymmenessä, joka olisi huomattavasti suurempi siirtymä verrattuna Parmesanin & Yohen (2003) mainitsemaan metatutkimusten ennusteeseen: globaalilla tasolla tämä muutos on noin 6,1

metriä. Tämän keskimääräistä suuremman muutoksen ennustaminen tukee havaintoja siitä, että korkeat leveyspiirit ja vuoristot tulevat kohtaamaan suurimman muutoksen lämpötilojen kasvussa (Jozefat 2016: 63; Gaire ym. 2014: 1278). Esimerkiksi Ural-vuoristolla kesälämpötila on noussut ilmastonmuutoksen johdosta yhdellä celsiusasteella ja talvilämpötilat jopa neljällä celsiusasteella (Grace ym. 2002: 542), mikä on huomattavasti enemmän kuin keskimääräinen lämpötilannousu maapallolla. Näin ollen voidaan todeta, että korkeilla leveysasteilla ilmastonmuutos tulee muuttamaan puurajojen sijaintia enemmän kuin muualla maapallolla, sillä lämpötila on tällä alueella rajoittava tekijä.

Pohjoisen pallonpuoliskon boreaalinen kylmätalvinen vyöhyke puuttuu melkein kokonaan eteläiseltä pallonpuoliskolta, sillä maapinta-alaa on ylipäättään tällä puoliskolla vähemmän kuin pohjoisella. Sen sijaan subarktisia saaria on eniten eteläisellä pallonpuoliskolla. Alueen kasvillisuudella on enemmän samankaltaisuutta trooppisiin ylänköihin kuin boreaaliin vuoristoihin: ikivihreitä, leveälehtisiä puita ja kukkia kasvaa kaikkina vuodenaikoina (Troll 1973: 14-15). Koska ilmaston lämpenemisen johdosta maanpinta tulee lämpenemään nopeammin verrattuna meriin (Jozefat 2016: 63; Gaire ym. 2014: 1278), subarktiset saaret saattavat selvitä suhteellisen vähällä muutoksella, sillä niitä ympäröivät viileät vesimassat viilentävät paikallista ilmastoa.

6.3. Subtrooppinen vyöhyke

Kaikkien maanosien lauhkean ja trooppisen vyöhykkeen välillä on leveät ilmastoltaan aridit vyöhykkeet. Koska kosteus lisääntyy yleisesti korkeuden kanssa (orografiset sateet, pilvisyys ja ilmankosteus) ja lämpötila laskee, ovat vuoristot näiden kuivien alueiden vihersaaria runsaamman kasvillisuutensa vuoksi (Troll 1973: 10). Kuivien vyöhykkeiden puurajan kasvillisuus eroaa ilmastovyöhykkeen ja alueen kaltevuuden mukaan. Kosteiden trooppisten vyöhykkeiden trooppiset vuoristometsävyöhykkeet ulottuvat kuivien alueiden, jopa aavikoiden vuoristoihin, esimerkiksi päiväntasaajan Afrikasta Länsi-Etiopiaan. Siellä, missä metsät ovat samoilla korkeuksilla kuin pilvivyöt, kuivuus rajoittaa puiden kasvua (Troll 1973: 12). Arideilla alueilla heikko sademäärä ja kasvien käytettävissä olevan veden rajallinen määrä ovat hallitsevassa asemassa puurajan

paikallisessa sijainnissa lämpötilan sijaan (Holtmeier & Broll 2007: 2). Toisin kuin lauhkeilla ja boreaalisilla alueilla, subtrooppisella ja trooppisella vyöhykkeellä tuuli, pakkasvauriot ja lumen kertyminen ovat vähemmän rajoittavia tekijöitä puurajan sijainnin muodostumisessa (Jacob ym. 2015: 17). Tulevaisuudessa veden saannista voi tulla kuivilla alueilla vaikeampaa kuin ennen (Oksanen 2004: 41), mikä saattaa siirtää puurajoja yhä korkeammalle: samaan aikaan matalammalla olevat puut voivat hävitä kuivuuden takia, ja näin ollen metsä- ja puuvyöhyke liikkuu vuoristolla ylemmäs. Tätä tulevaa muutosta tukee Hulmen ym. (2001: 161) huomio siitä, että jotkin Länsi-Afrikan Sahelin alueesta tulevat kokemaan tulevaisuudessa huomattavia sademäärän heikkenemisiä kesä-elokuussa.

Välimerellä ja Lähi-idässä vuoristoalueet ovat erillään avomeristä ja mannerten kuivista keskuksista. Välimeren alueella voidaan karkeasti erottaa kolme ilmastollista osa-alueita. Tämän alueen pohjoisosissa vuoristoilla on talvi- ja kesäsateita ja metsät ovat boreaalista havupuu- ja lehtimetsää. Välimeren ilmastoalueen keskellä puuraja muodostuu lehtipuista, etenkin tammesta. Eteläosissa, missä kesäkuivuus ulottuu yhä korkeammalle vuoristojen rinteille, katajat ovat puurajan muodostava pääpuulaji. Tällä alueella lämpötila ei ole rajoittava tekijä. Talvisin lunta on vuoristoilla niukasti ja kesät ovat kuivia. Alueen kasvillisuus onkin kuivuuteen sopeutunutta (Troll 1978: 13). Tulevaisuudessa ilmastomuutos tulee muuttamaan sademääriä ja sateen jakautumista maapallolla yhä kärjistetympin (Oksanen 2004: 41), mikä tulee vaikuttamaan aridien alueiden vuoristojen puurajoihin, sillä kosteus on rajoittava tekijä jo ennestäänkin (Troll 1978: 13).

Yllä mainituista alueista poiketen Aasian ylängöillä puurajaan vaikuttaa toisenlainen ilmiö. Alueella on laajempi ja kapeampi vuoristomaisemavyöhyke, jonka metsät erilaistuvat kahteen rinteeseen: varjoiseen ja aurinkoiseen vuorenrinteeseen. Tropiikissa tällaista erilaistumista ei esiinny vuoden aikana. Keski-Aasiassa vuoristojen pohjoispuolen rinteillä kasvaa havumetsiä aina puurajaan saakka; Eteläpuolella erilaiset katajat. Erot johtuvat siitä, että alue ei sijaitse tropiikissa ja näin ollen päiväntasaajan puoleiset rinteet saavat enemmän aurinkoa ympäri vuoden (Troll 1978: 12). Tämä auringonpaisteen saannin ero vaikuttaa paikallisesti ja alueellisesti eri puulajien menestymiseen. Tulevaisuudessa auringonvalon saanti ei tule muuttumaan

ilmastonmuutoksen johdosta, joten erot aurinkoisen ja varjoisen rinteiden välillä tulevat jatkumaan. Jätän Aasian vuoristot vähemmälle tarkastelulle, sillä yksikään esimerkkialueistani ei käsitellyt tämän alueen vuoristoja ja tällä alueella vallitsee oma erityinen ilmastonsa, monsuuni-ilmaasto (Kramer ym. 2010: 23-24).

6.4. Trooppinen vyöhyke

Boreaalisen vyöhykkeen sijaan puuraja trooppisella vyöhykkeellä on erityispiirteiltään ja rajoituksiltaan erilainen. Esimerkiksi ilmastolliset olosuhteet ja ekologiset rajoitteet ovat erilaisia. Lämpötilojen suhteen trooppiset alueet eroavat niin vuorokausi- kuin vuodenaikaisvaihteluiden suhteen. Trooppisilta vuoristoilta puuttuu kylmän talven ja lämpimän kesän kontrasti (Troll 1973: 8). Wardlen ja Colemanin (1992: 11) mukaan lämpötilavaihtelussa päivittäinen vaihtelu on troopiikissa paljon merkittävämpi kuin vuodenaikaisvaihtelu. Itä-Afrikassa tehdyt tutkimukset osoittavat paikallisten ilmastotekijöiden monimutkaisuuden: laaksot viilenevät öisin ja tuulet kuivattavat rinteitä sekä laaksojen rinteet erodoituvat (Troll 1973: 9-10). Erodoitumiseen kannattaa kiinnittää huomiota muidenkin ilmastoalueiden vuoristoalueilla, sillä erodoitunut maaperä ei ole otollinen kasvualusta puille maa-aineksen liikkumisen vuoksi. Usein kausittainen sademäärä on rajoittavampi tekijä näillä leveysasteilla lämpötilaan verrattuna. Aivan päiväntasaajan tuntumassa kosteusolot eivät juurikaan muutu vuodenaikojen välillä (Troll 1973: 8).

De Witin ja Stankiewiczin (2006) skenaarion mukaan trooppisten alueiden vuorilla sademäärät tulevat kasvamaan 10-20 prosenttia vuoteen 2100 mennessä. Päiväntasaajan alueella sateiden odotetaan kasvavan 5-30 prosenttia jouluihelmikuussa, mutta laskevan 5-10 prosenttia kesä-elokuussa. Näiden muutosten vaikutusta puurajaan on kuitenkin vaikea ennustaa (Hulme ym. 2001: 160-161). Lisääntynyt sademäärä ja tasaisempi jakautuminen vuoden aikana tasoittaa puiden veden saantia ja siten parantaa puiden kasvua puurajalla. Toisaalta nämä muutokset lisäävät samalla pilvisyyttä, joka alentaa epäsuorasti ilman lämpötilaa (Jacob ym. 2015: 14). Lisäksi tulevien sademäärien ennustaminen on Afrikassa vaikeaa suurten sademäärävaihteluiden vuoksi (Jacob ym. 2015: 14).

Hulmen ym. (2001) mukaan viime vuosisadan aikana Afrikan lämpötila on noussut 0,5 celsiusastetta, mikä on vähemmän kuin maapallon ilmaston lämpeneminen keskimääräisesti (Fang ym. 2011: 1). Tulevaisuudessa useammin esiintyvät ja jatkuvat kuivat kaudet saattavat vaikuttaa tällä alueella puurajaan enemmän kuin keskimääräinen lämpötilan nousu (Rundel ym. 1994 Holtmeier & Broll 2007: 15 mukaan). Trooppisilla vuoristoilla puurajat sijaitsevat nykyisen potentiaalisen ilmaston alapuolella, sillä puurajat eivät ole pysyneet ilmastonmuutoksen mukana holoseenin aikana. Syitä tähän on monia, kuten väestöpaineen aiheuttamat häiriöt (lähinnä tulipalot, pastoraalinen käyttö ja puiden hyödynnys arjessa, joka on esimerkiksi Afrikassa intensiivistä muihin mantereisiin nähden) (Holtmeier & Broll 2007: 15; Jacob ym. 2015: 17). Tulevaisuudessa kasvava osa maailman väestöstä asuu Afrikassa, sillä Afrikan väestö kasvaa erittäin nopeasti, jopa kolme prosenttia vuodessa (FAO 2007). Kasvava väestö ja karjan laidunnus lisäävät edelleen trooppisten ylänköjen ympäristöpaineita (Burgess ym. 2007), joten puurajat voivat taantua entistä alemmaksi. Lisäksi puun taimet altistuvat liialle auringonsäteilylle (Holtmeier & Broll 2007: 15; Jacob ym. 2015: 17). Suuri vuorokauden säteilykuormitus yhdistettynä yön alhaisiin lämpötiloihin estää taimien vakiintumista metsärajojen yläpuolella (Bader 2007).

Harch ym. (2009) analysoivat tutkimuksessaan yhteensä 166 eri vuoristojen ja ylänköalueiden puurajoja. Näistä 166 puurajasta vain neljä sijaitsi trooppisella vyöhykkeellä, ja yksikään näistä ei sijainnut Afrikassa. Tämä johtuu siitä, ettei Afrikan trooppisten ylänköjen puurajoihin vaikuttavista tekijöistä juuri tiedetä (Körner 2012). Jacob ym. (2015: 18) mainitsevatkin omassa tutkimuksessaan, että metsä- ja puurajatutkimusta Afrikan trooppisilla ylängöillä on erittäin tärkeää jatkaa, jotta ymmärrys trooppisen vuoristokasvillisuuden reagoinnista ympäristön erilaisiin muutoksiin paranisi. Monet muutkin tahot ovat tutkimuksissaan ja kirjallisuuskatsauksissaan maininneet eteläisen pallonpuoliskon ja tropiikin tietojen vähäisyydestä (Holtmeier & Broll 2007: 2).

6.5. Tulevaisuuden ennustaminen on vaikeaa

Metsä- ja puurajojen ennustaminen on kuitenkin ongelmallista, sillä monissa paikoissa puurajan nykyinen sijainti ei ole tasapainossa nykyisenkään ilmaston kanssa (Holtmeier & Broll 2007: 8). Epävarmuutta ennusteisiin tuo se, ettei ilmaston tulevia muutoksia voida ennustaa tarkasti (Jylhä 2012: 9). Lisäksi ennusteet puurajan tulevaisuuden sijainnista perustetaan yleensä tiedolle aiemman ja nykyisen puurajan dynamiikasta – puurajan sijaintiin vaikuttavien tekijöiden monimutkaisuus ei anna syytä olettaa, että pystyisimme luotettavasti ennustamaan puiden kasvua, uudistumista ja selviytymistä. Tarkkojen ennusteiden esteenä on se, että puiden kasvuun vaikuttavien tekijöiden ja niiden suhteellisten tehokkuuksien nykyisiä keskinäisiä suhteita ei tiedetä (Holtmeier & Broll 2007: 8, 20). Tulevaisuuden ennustamiseen tarvittaisiinkin siis lisää tutkimuksia, jotta esimerkiksi hiilidioksidin ja muiden fotosynteesiä nopeuttavien pitoisuuksien kasvun yhteyttä osattaisiin paremmin ottaa huomioon ympäristömuutoksien yhteydessä (Leakey ym. 2009). Se kuitenkin tiedetään, että jatkamalla hiilidioksidin ja muiden päästöjen tuottamista nykyistä vauhtia, maapallo lämpenee viidestä kymmeneen kertaa nopeammin kuin viimeisimmän jääkauden jälkeen. Monien puiden migraationopeus ei ole näin nopea – kun puu saavuttaa täysikasvuisuuden ja alkaa tuottaa siemeniä, ei ympäristö ilmastoineen enää välttämättä ole otollinen siementen kasvuun ja seuraavaa sukupolvea ei kehity (Abrahamson 2009: 5).

On olemassa useita selittäviä syitä, miksi metsä- ja puurajat eivät reagoi odotetusti lämpötilanmuutoksiin. Ensinnäkin tutkimusmenetelmissä voi olla eroja havaita ja mitata tapahtuva muutos (Harsch ym. 2009: 1047). Toiseksi vuoristoalueiden metsäpeitteissä saattaa ilmetä huomattavaa viivettä ilmastomuutokseen reagoinnissa, vaikka yksittäisten puiden kasvuolosuhteet saattaisivat olla parantuneet huomattavasti (Rannow 2013: 574). Puurajat ovatkin usein parin vuoden, tai jopa vuosikymmenen, ilmastoa jäljessä (Harsch ym. 2009: 1047). Näin ollen lämpenemisestä ei seuraa välitöntä, homogeenistä metsäpeitteen tai puurajan etenemistä kohti vuoristojen huippuja (Rannow 2013: 574). Lisäksi monivuotisella vaihtelulla on merkitystä puurajan etenemiseen. Varsinkin puiden taimet ovat herkkiä lyhyille kylmille ajanjaksoille: normaalia kylmempi talvi saattaa tuhota useiden kesien aikana saavutetun etenemisen (Harsch ym. 2009: 1047).

Lisäksi usein globaalilla tasolla tarkastellessa paikalliset erot jäävät huomioitta ja tällöin saatetaan korostaa liikaa lämpötilaa tai sademäärää (Körner & Paulsen 2004). Monesti unohdetaan, että ilmasto on vain yksi puiden kasvuun vaikuttavista tekijöistä (Holtmeier & Broll 2005: 1). Täytyykin muistaa, että tässä LuK-tutkielmassa tehdyt päätelmät perustuvat pääosin lämpötilan tai sademäärän muutoksiin tulevaisuudessa, joten ennusteet ovat melko suurpiirteisiä. Jotta ennusteista saataisiin tarkempia, pitäisi tutkia yhä useampia vuoristoja ja yhä useampien rajoittavien tekijöiden muutoksia ja yhteyksiä puun kasvuun. Holtmeier ja Broll (2007: 20) toteavatkin tärkeimpien rajoittavien tekijöiden vaihtelevan skaalan mukaan (ilmaston tutkimisen sijaan esimerkiksi mikroilmaston tutkimista). Alueelliset, paikalliset ja ajalliset vaihtelut voivat myös olla seurausta puulajien erilaisesta reaktiosta muuttuvaan ilmastoon (Holtmeier & Broll 2007: 4). Täytyykin muistaa, että jokaisella puulajilla on omat rajoitteensa vuoristoilla (Körner 2012: 21): eri lajien kasvuvaatimukset pitäisi huomioida tarkemmin puurajan siirtymistä tutkittaessa. Vaikka jatkuvaa lämpenemistä seuraa todennäköisesti puurajan siirtyminen korkeammalle myös kuivuus, rajut pakkaset kasvukaudella, hyönteismassat ja metsäpalot voivat lisääntyä ilmastonmuutoksen johdosta ja aiheuttaa puiden kehitykselle takaiskuja paikallisesti (Holtmeier & Broll 2007: 13).

Vaikka tutkimuksissa todettaisiin puu- ja metsärajojen siirtyneen korkeammalle, eivät puulajit ole välttämättä laajentaneet omaa kasvualuettaan: monissa puurajaekotoneissa tähän mennessä kääpiökasvuiksi jääneet puut (tai vielä aiemmin taimiksi luokitellut puut) ovat alkaneet kasvaa pidemmiksi ja täten ne luokitellaan puiksi ja puuraja nousee korkeammalle. Tämä on seurausta ympäristönmuutoksesta (Holtmeier & Broll 2007: 6). Lisäksi puurajat reagoivat nouseviin lämpötiloihin pääasiassa asteittain täydentämällä olemassa olevien puiden ja puuryhmien välisiä aukkoja (Holtmeier & Broll 2007: 11), kuten Alpeilla tehdyssä tutkimuksessa ilmeni (Gehrig-Fasel 2007).

Tämä LuK-tutkielma osoittaa, että on olemassa useitakin syitä, miksi keskittyä ilmastonmuutoksen moninaisiin vaikutuksiin vuoristoalueilla (Diaz ym. 2003: 3) ja miksi tutkia yhä tarkemmin erilaisia ilmastonmuutoksen aiheuttamia muutoksia ja niiden aiheuttamia reaktioita vuoristojen metsä- ja puurajoilla. Aiheen syy-seuraussuhteet ovat moninaisia, sillä maapallon metsät vaikuttavat ilmastoon (Bonan 2008), mutta toisaalta ilmastolla on vaikutusta metsiin (Holtmeier & Broll 2005). Yhteenvetona

voidaan todeta, että noin puolet maailmanlaajuisesti tutkituista puuraja-alueista ovat edenneet 1900-luvulta lähtien ja tulevat tulevaisuudessa yhä jatkamaan etenemistään (Harsch 2009). Etenkin korkeat leveyspiirit tulevat kohtaamaan muutoksen lämpötilojen kasvussa (Jozefat 2016: 63; Gaire ym. 2014: 1278), joten vuoristot korkeilla leveyspiireillä ovat todennäköisesti alttiimpia ilmastonmuutoksen vaikutuksille.

Lähteet

- Abrahamson, D. E. (1989). Global warming: The issue, impacts, responses. *Teoksessa* Abrahamson, D. E. (toim): *The Challenge of Global Warming*, 3-34. Island Press, Washington D.C. & Covelo California.
- Ahti, T., L. Hämet-Ahti & J. Jalas (1968). Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Annales Botanici Fennici* 5, 169–211.
- Alley, R. B. (2016). A heated mirror for climate. *Science* 352, 151-152.
- Arzac, A., L. D. Llambí, R. Dulhoste, J. M. Olano & E. Chacón-Moreno (2019). Modelling the effect of temperature changes on plant life-form distribution across a treeline ecotone in the tropical Andes. *Plant ecology & diversity* 12, 619-631.
- Attrill, M. J. & S. D. Rundle (2002). Ecotone or Ecocline: Ecological Boundaries in Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55, 929-936.
- Bader, M.Y. (2007). *Tropical alpine treelines: how ecological processes control vegetation patterning and dynamics*. Väitöskirja. Wageningen University. Netherlands. 192 s.
- Bio-Brief#2: Climate Change (2013). What is Climate Change? <<http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Impacto/9.pdf>>. 15.3.2020.
- Blanco, J. A. (2009). The Legacy of Forest Management: Analyzing Its Influence on Tree Growth with Ecosystem Models. *Teoksessa* Karam, W. P. (toim.): *Tree Growth: Influences, Layers and Types*, 1-26. Nova Science Publishers, New York.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320, 1444-1449.
- Burgess, N., A. Balmford, N. Cordeiro, J. Fjeldsa, W. Kuper, C. Rahbek, E. Sanderson, J. Scharlemann, J. Sommer & P. Williams (2007). Correlations among species distributions, human density and human infrastructure across the high biodiversity tropical mountains of Africa. *Biological Conservation* 134, 164–177.
- Cairns, D. M. & G. P. Malanson (1997). Examination of the carbon balance hypothesis of alpine treeline location Glacier National Park, Montana. *Physical Geography* 18, 125–145.

- Dale, V. H., L. A. Joyce, S. McNulty & R. P. Neilson (2000). The interplay between climate change, forests, and disturbances. *The Science of the Total Environment* 262, 201-204.
- Davis, M. B. & R. G. Shaw (2001). Range Shifts and Adaptive Responses to Quaternary Climate Change. *Science* 292, 673-679.
- De Wit, M. & J. Stankiewicz (2006). Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science* 311, 1917-1921.
- Diaz, H. F., M. Grosjean & L. Graumlich (2003). Climate variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present and Future. *Climatic Change* 59, 1-4.
- Fang, J., J. Zhu, S. Wang, C. Yue & H. Shen (2011). Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. *Science China Earth Sciences* 54, 1458-1468.
- FAO (2007). *State of the world's forest*. 144 s. FAO, Rome.
- Gaire, N. P., M. Koirala, D. R. Bhujju & H. P. Borgaonkar (2014). Treeline dynamics with climate change at the central Nepal Himalaya. *Climate of the Past* 10, 1277-1290.
- Gehrig-Fasel, J., A. Guisan & N. E. Zimmermann (2007). Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18, 571-582.
- Grace, J., F. Berninger & L. Nagy (2002). Impacts of Climate Change on the Tree Line. *Annals of Botany* 90, 537-544.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea & M. Medina-Elizade (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103, 14288-14293.
- Harsch, M. A., P. E. Hulme, M. S. McGlone & R. P. Duncan (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters* 12: 1040-1049.
- Hofer, T. (2005) Introduction: The International Year of Mountains Challenge and Opportunity for Mountain Research. *Teoksessa Huber, U. M., H. K. Bugmann & M. A. Reasoner (toim.): Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge*, 1-8. Springer, Netherlands.
- Holtmeier, F-K. (1965). *Die Waldgrenze im Oberengadin in ihrer physiognomischen und ökologischen Differenzierung*. Vaitöskirja. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. 163 s.

- Holtmeier, F-K. (1985). Die klimatische Waldgrenze – Linie oder Übergangssaum (Ökoton)? Ein Diskussionsbeitrag unter besonderer Berücksichtigung der Waldgrenzen in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel. *Erdkunde* 39, 271-285.
- Holtmeier, F-K. (1993). Der Einfluß der generativen und vegetativen Verjüngung auf das Verbreitungsmuster der Bäume und die ökologische Dynamik im Waldgrenzbereich. Beobachtungen und Untersuchungen in Hochgebirgen Nordamerikas und den Alpen. *Geoökodynamik* 14, 153-182.
- Holtmeier, F-K. (2002). Tiere in der Landschaft. Einfluss und ökologische Bedeutung. 367 s. UTB, Stuttgart.
- Holtmeier, F-K. (2003). *Mountain timberlines. Ecology, patchiness, and dynamics. Advances in Global Change Research* 14. 384 s. Springer, Netherlands.
- Holtmeier, F-K. & G. Broll (2005). Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treeline to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography* 14, 395-410.
- Holtmeier, F-K. & G. Broll (2007). Treeline Advance – Driving Processes and Adverse Factors. *Landscape Online* 1, 1–33.
- Holtmeier, F-K. (2009). *Mountain Timberlines: Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advances in Global Change Research* 36. 438 s. Springer, Netherlands.
- Hulme, M., R. Doherty, T. Ngara, M. New & D. Lister (2001). African climate change: 1900–2100. *Climate Research* 17, 145–168.
- Ives, J. D. (1973). Studies on high altitude geocology of the Colorado Front Range: A review of the research program of the Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado. *Arctic and Alpine Research* 5, 67-75.
- Jacob, M., S. Annys, A. Frankl, M. De Ridder, H. Beeckman, E. Guyassa & J. Nyssen (2015). Tree line dynamics in the tropical African highlands – identifying drivers and dynamics. *Journal of Vegetation Science* 26, 9-20.
- Jozefat, B. (2016). Climate Change and All Evidences of Global Warming. *Teoksessa Wong, K. V. (toim.): Climate Change*, 61-74. Momentum Press, New York.
- Jylhä, K., K. Ruosteenoja, J. Räisänen, A. Venäläinen, H. Tuomenvirta, L. Ruokolainen, S. Saku & T. Seitola (2009). *Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009*. 102 s. Ilmatieteen laitos, Helsinki.

- Kramer, A., U. Herzschuh, S. Mischke & C. Zhang (2010). Holocene treeline shifts and monsoon variability in the Hengduan Mountains (southeastern Tibetan Plateau), implications from palynological investigations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 286, 23–41.
- Kellomäki, S., H. Peltola, T. Nuutinen, K. T. Korhonen & H. Strandman (2007). Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 2341–2351.
- Kullman, L. (2002). Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90, 68–77.
- Kullman, L. (2005) Old and new trees on Mt Fulufjället in Dalarna, central Sweden. *Svensk Botanisk Tidskrift* 99, 315–329.
- Kullman, L. (2007). Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology. *Journal of Ecology* 95, 41–52.
- Körner, C. (1998). A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115, 445–459.
- Körner, C. (2003). Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology* 91, 4–7.
- Körner, C. & J. Paulsen (2004). A World-Wide Study of High Altitude Treeline Temperatures. *Journal of Biogeography* 31, 713–732.
- Körner, C. (2007). The use of ‘altitude’ in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution* 22, 569–574.
- Körner, C. (2012). *Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. 220 s. Springer, Basel.
- Leakey, A. D. B., E. A. Ainsworth, C. J. Bernacchi, A. Rogers, S. P. Long & D. R. Ort (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany* 60, 2859–2876.
- Leonelli, G., M. Pelfini, U. M. di Cella & V. Garavaglia (2011). Climate Warming and the Recent Treeline Shift in the European Alps: The Role of Geomorphological Factors in High-Altitude Sites. *Ambio* 40, 264–273.
- Malanson, G. P., L. M. Resler, M. Y. Bader, F-K. Holtmeier, D. R. Butler, D. J. Weiss, L. D. Daniel & D. B. Fagre (2011). Mountain Treelines: a Roadmap for Research Orientation. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 43, 167–177.
- Marjakangas, A. (2011). *Ilmastonmuutos lähiluonnossamme*. 144 s. Mediapinta, Tampere.

- Mather, A.S. & J. Fairbairn (2000). From floods to reforestation: The Forest Transition in Switzerland. *Environment and History* 6, 399-421.
- Matyssek, R. & H. Jr. Sandermann (2003). Impact of ozone on trees: and ecophysiological perspective. *Teoksessa* Esser, K., U. Lüttge, W. Beyschlag, F. Wellwig (toim.): *Progress in Botany* 64, 349-404. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Mellmann-Brown, S. (2002). *The regeneration of whitebark pine in the timberline ecotone on Beartooth Plateau, Montana and Wyoming*. Vaitöskirja. Fachbereich Geowissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. 156 s.
- Messerli, B. & J. D. Ives (toim.) (1997). *Mountains of the World: A Global Priority*. 495 s. Parthenon Publishing, New York-Carnforth.
- Miehe, G. & S. Miehe (1994). *Ericaceous Forests and Heathlands in the Bale Mountains of South Ethiopia – Ecology and man's Impact*. 206 s. Warnke, Hamburg.
- Moen, J., K. Aune, L. Edenius & A. Angerbjörn (2004). Potential Effects of Climate Change on Treeline Position in the Swedish Mountains. *Ecology and Society* 9: 16-26.
- Oksanen, E. (2004). Ilmastonmuutoksen biologiset vaikutusmekanismit metsäpuilla. *Teoksessa* Riikonen, J. & E. Vapaavuori (toim.): *Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät*, 41-51. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki.
- Parmesan, C. & G. Yohe (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37-42.
- Pearson, R. G. & T. P. Dawson (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12, 361-371.
- Rannow, S. (2013). Do shifting forest limits in south-west Norway keep up with climate change? *Scandinavian Journal of Forest Research* 28, 574-580.
- Rebetez, M. & M. Reinhard (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology* 91, 27–34.
- Rundel, P. W., F. C. Meinzer & A. P. Smith (1994). Tropical alpine ecology: progress and priorities. *Teoksessa* Rundel, P. W., A. P. Smith & F. C. Meinzer (toim.): *Tropical alpine environments. Plant form and function*, 355-363. Cambridge University Press, Los Angeles.
- Schneider, S. (2001). What is 'dangerous' climate change? *Nature* 411, 17-19.

- Seki, T., T. Kajimoto, H. Sugita, H. Daimaru, S. Ikeda & T. Okamoto (2005). Mechanical damage on *Abies mariesii* trees buried below the snowpack. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 37, 34-40.
- Slatyer, R. O. & I. R. Noble (1992). Dynamics of Montane Treelines. *Teoksessa* Hansen, A. J. & F. DiCasteri (toim.): *Landscape Boundaries: Consequences of Biotic Diversity and Ecological Flows*, 346-359. Springer, New York.
- Smith, W. K., M. J. Germino, T. E. Hancock & D. M. Johnson (2003). Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. *Tree Physiology* 23, 1101-1112.
- Tasanen, T. (1996). Metsärajan ja sen tutkimuksen kehitysnäkymiä. *Folia Forestalia* 3, 290-295.
- Troll, C. (1973). The Upper Timberlines in Different Climatic Zones. *Arctic and Alpine Research* 5, 3-18.
- Väre, H. (2001). Mountain birch taxonomy and floristics of mountain birch woodlands. *Teoksessa* Wielgolaski, F.E. (toim.): *Nordic mountain birch ecosystems. Man and the biosphere series* 27, 35-46. UNESCO, Paris.
- Walther, P. (1986). Land abandonment in the Swiss Alps a new understanding of a land-use problem. *Mountain Research and Development* 6, 305-314.
- Wardle, P. & M. C. Coleman (1992). Evidence for rising upper limits of four native New Zealand forest trees. *New Zealand Journal of Botany* 30, 303-314.
- Wesche, K., G. Miehe & M. Kaeppli (2000). The Significance of Fire for Afroalpine Ericaceous Vegetation. *Mountain Research and Development* 20, 340-347.
- Wong, K. V. & M. J. Pape (2016). Climate Change and Theories. *Teoksessa* Wong, K. V. (toim.): *Climate Change*, 5-26. Momentum Press, New York.